

Мощность двигателя трактора, оснащенного технологическим модулем

Максим Владимирович Сидоров¹,
кандидат технических наук, доцент;
Александр Владимирович Лавров²,
кандидат технических наук, ведущий научный
сотрудник, e-mail: vimlavrov@mail.ru;

Виктор Александрович Воронин³,
аспирант;
Анастасия Владимировна Сидорова⁴,
аспирант

¹Калужский филиал Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К.А.Тимирязева, г. Калуга, Российская Федерация;

²Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация;

³Брянский государственный аграрный университет, г. Брянск, Российская Федерация;

⁴Калужский филиал Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана, г. Калуга, Российская Федерация

Реферат. Отметим дефицит тракторов класса 2 и 3 в крестьянских хозяйствах. В качестве решения данной проблемы предложили разработать технологический модуль, позволяющий повысить универсальность тракторов класса 1,4 путем перевода их в более высокий тяговый класс. (*Цель исследования*) Обосновать номинальную эксплуатационную мощность двигателя для трактора с технологическим модулем. (*Материалы и методы*) Для расчета необходимой мощности предложили методику, учитывающую конструктивные особенности модульного построения машинно-тракторного агрегата. (*Результаты и обсуждение*) Показали, что для модульного энергосредства с колесной формулой 6К6 следует учитывать ряд дополнительных факторов, влияющих на точность расчета: во-первых, тягово-сцепные свойства трактора зависят от количества ведущих осей; во-вторых, буксование колес по отдельным осям неодинаково и обусловлено конструктивно заданным кинематическим несоответствием в их приводе; в-третьих, КПД трехосной трансмиссии можно определить только как суммарный показатель трех ветвей трансмиссии, то есть на привод передних и задних колес трактора и отдельно – на привод колес технологического модуля. Сравнили требуемую мощность двигателя при использовании трактора с балластом и с технологическим модулем. (*Выводы*) Определили, что для достижения предельной по сцеплению силы тяги на крюке при переходе в следующий более высокий класс тяги необходимо, чтобы трактор, к которому подсоединяется технологический модуль, обладал энергонасыщенностью 2,00-2,41 киловатта на килоньютон, что соответствует тракторам тягово-энергетической концепции, у которых мощность двигателя не может быть реализована через тягу. Выявили, что энергонасыщенность трактора с технологическим модулем будет равна 1,59-1,65 киловатта на килоньютон, что соответствует трактору тяговой концепции и позволяет реализовать заложенную мощность двигателя через тягу.

Ключевые слова: тягово-энергетическая концепция трактора, трактор с балластом, энергетический модуль, технологический модуль, модульное энерготехнологическое средство.

Для цитирования: Сидоров М.В., Лавров А.В., Воронин В.А., Сидорова А.В. Мощность двигателя трактора, оснащенного технологическим модулем // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. №2. С. 33-40. DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-2-33-40.

Engine Power Required When Using a Tractor with a Technology Module

Maksim V. Sidorov¹,
Ph.D.(Eng.), associate professor;
Aleksandr V. Lavrov²,
Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: vimlavrov@mail.ru;

Virtor A. Voronin³,
post-graduate student;
Anastasiia V. Sidorova⁴,
post-graduate student

¹Kaluga Branch of the Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Kaluga, Russian Federation;

²Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation;

³Bryansk State Agrarian University, Bryansk, Russian Federation;

⁴Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, Russian Federation

Abstract. A shortage of class 2 and class 3 tractors was observed in peasant farms. As a solution to this problem, it was proposed to develop a technological module that would increase the versatility of class 1.4 tractors by transferring them to a higher traction class. (*Research purpose*) The authors aimed to substantiate the nominal operating power of the engine for a tractor with a technological module. (*Materials and methods*) To calculate the required power, the authors proposed a method that takes into account the design features of the modular construction of a machine-tractor unit. (*Results and discussion*) The authors showed that for a modular power unit with a 6K6 wheel arrangement, it is necessary to consider a number of additional factors having an impact on the accuracy of the calculation: firstly, the tractor's traction and coupling properties depend on the number of driving axles; secondly, the wheel slippage along individual axes is not the same and occurs due to a constructively conditioned kinematic discrepancy in their drive; thirdly, the three-axle transmission efficiency can be determined only as a total indicator of three transmission branches, that is, to drive the tractor front and rear wheels and, separately, to drive the wheels of the technological module. The authors compared the required engine power when using a tractor with ballast and that with a technological module. (*Conclusions*) It was determined that in order to achieve the maximum traction force of adhesion on the hook when moving to the next higher traction class, it is necessary that the tractor, that the technological module is joint to, has the energy saturation of 2.00-2.41 kilowatts per kilonewton, which corresponds to traction and energy concept tractors whose engine power cannot be realized through traction. It was found that the power saturation of the tractor with the technological module will be equal to 1.59-1.65 kilowatts per kilonewton, which corresponds to the tractor of the traction concept and allows realizing the built-in engine power through traction.

Keywords: traction and energy concept of a tractor, tractor with ballast, energy module, technological module, modular power-processing means, modular energy technology facility.

For citation: Sidorov M.V. Lavrov A.V., Voronin V.A., Sidorova A.V. Moshchnost' dvigatelya traktora, osnashchennogo tekhnologicheskim modulem [Engine power of a tractor equipped with a technology module]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2021. Vol. 15. N2. 33-40 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-2-33-40.

Эффективность развития крестьянских (фермерских) хозяйств в значительной мере определяется перспективностью направления производственной деятельности, природно-климатическими условиями, рациональной организацией производства и оснащенностью техникой. Несмотря на небольшие обрабатываемые площади, оптимальный типаж для фермерских хозяйств должен включать в себя тракторы тяговых классов 1,4; 2 и 3 [1].

Однако ввиду низкой платежеспособности хозяйства применяют как правило 1-2 трактора класса 1,4. При этом для фермера важно самостоятельно выполнять максимально возможный объем работ, так как привлечение со стороны сельскохозяйственной техники и трудовых ресурсов обычно обходится намного дороже, а иногда и невозможно. В этих условиях целесообразно иметь устройство, повышающее универсальность имеющихся тракторов, позволяющее переводить их в более высокий смежный тяговый класс. При этом цена устройства должна быть доступной. Такую задачу можно решить несколькими способами, применяя балласты, приводные сельскохозяйственные машины или технологические модули [2-7].

С этой целью на основе существующей элементной базы создан технологический модуль (ТМ), позволяющий перевести серийно выпускаемый трактор класса 1,4 (Беларус 82.1) в тяговый класс 2 (рис. 1) [8, 9].

Основные агротехнические требования на ТМ разработаны при участии творческого коллектива науч-

ных работников в ФНАЦ ВИМ. Эти требования основаны на имеющемся научно-техническом заделе и результатах анализа перспективных агротехнологий [10-12].

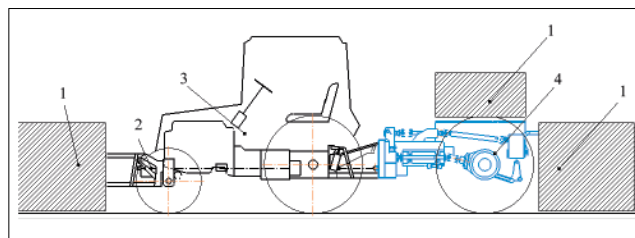


Рис. 1. Технологические пространства на тракторе с технологическим модулем: 1 – технологические пространства; 2 – переднее навесное устройство; 3 – трактор; 4 – технологический модуль

Fig. 1. Technological spaces on a tractor with a technological module: 1 – technological spaces; 2 – front hitch; 3 – tractor; 4 – technological module

Компоновочная и конструктивная проработка ТМ, включающая адаптацию ТМ к агротехническим требованиям и серийно выпускаемым тракторам Беларус 82.1, проведены в Калужском филиале МГТУ имени Н.Э. Баумана [13-14].

Для наиболее эффективной эксплуатации машинно-тракторного агрегата (МТА), построенного на базе трактора и ТМ, необходимо рассчитать мощность двигателя трактора с учетом особенностей конструкции модульного энергетического средства (МЭС).

Цель исследования – обосновать номинальную эксплуатационную мощность двигателя для трактора с технологическим модулем.

Материалы и методы. Номинальную эксплуатационную мощность двигателя трактора тяговой концепции принято рассчитывать по формуле:

$$N_{н.э} = \frac{(P_{кр.н} + P_f) v_{тр.н}}{\eta_{тр} (1 - \delta_n)}, \quad (1)$$

где $P_{кр.н}$ – номинальное тяговое усилие трактора, кН;
 P_f – сила сопротивления качению трактора, кН;
 $v_{тр.н}$ – действительная скорость движения трактора при номинальном тяговом усилии, м/с;

$\eta_{тр}$ – механический КПД трансмиссии трактора;
 δ_n – допустимое значение буксования.

При модульной схеме комплектования трактора с технологическим модулем модульное энергосредство имеет колесную формулу 6К6. Поэтому при тяговом расчете таких тракторов необходимо учитывать ряд дополнительных факторов, влияющих на точность определения номинальной эксплуатационной мощности двигателя [15, 16].

Во-первых, тягово-сцепные свойства трактора зависят от количества ведущих осей. Помимо того, что при всех ведущих колесах в силу тяги реализуется полный вес трактора и возрастает коэффициент использования веса $\varphi_{кр}$, снижается коэффициент сопротивления качению f_k и повышается коэффициент сцепления φ_k вследствие прохода колес второго и третьего мостов по следу колес первого моста (рис. 2).

Во-вторых, буксование колес δ по отдельным осям неодинаково и зависит от конструктивно заданного кинематического несоответствия в их приводе (коэффициент k_n), а в выражении (1) используется буксова-

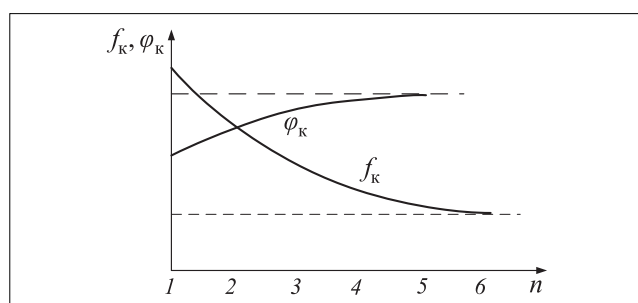


Рис. 2. Зависимость коэффициента сцепления φ_k и коэффициента сопротивления качению f_k от числа проходов n колеса по одному следу деформируемой поверхности

Fig. 2. The dependence of the adhesion coefficient φ_k and the rolling resistance coefficient f_k on the number of wheel passes n along one track of the deformable surface

ние колес только одного заднего моста трактора.

В-третьих, КПД трехосной трансмиссии $\eta_{тр}$ МЭС 6К6 можно определить расчетом только как сумму КПД трех ветвей трансмиссии отдельно на привод:

- передних колес трактора;

- задних колес трактора;

- колес ТМ.

Потери мощности в каждой ветви трансмиссии зависят от двух факторов [14, 15]:

- механического КПД ($\eta_{тр1}$, $\eta_{тр2}$, $\eta_{тр3}$);

- доли мощности двигателя, передаваемой через данную ветвь трансмиссии и учитываемую коэффициентом передачи мощности k_{N1} , k_{N2} , k_{N3} .

Номинальную эксплуатационную мощность двигателя будем определять как сумму мощностей, потребляемых отдельным мостом – передним, задним и ТМ:

$$N_{н.э.МЭС} = N_{н.э.п} + N_{н.э.ТМ}, \quad (2)$$

где $N_{н.э.МЭС}$ – мощность двигателя модульного энерготехнологического средства, кВт;

$N_{н.э.п}$ – мощность двигателя на привод колес переднего моста ЭМ, кВт;

$N_{н.э.к}$ – мощность двигателя на привод колес заднего моста ЭМ, кВт;

$N_{н.э.ТМ}$ – мощность двигателя на привод колес ТМ, кВт.

Тяговый расчет проводим с допущением, что все ведущие мосты заблокированы. При этом не учитывается паразитная мощность, затрачиваемая на скольжение отстающих колес при работе трактора с низкой тяговой нагрузкой.

Исходя из принятого условия, что номинальная эксплуатационная мощность двигателя равна сумме мощностей, реализуемых каждым ведущим мостом, силу тяги определяем, как сумму сил тяги мостов МЭС. Тогда для трактора с ТМ:

$$P_{кр.МЭС} = P_{кр.п} + P_{кр.к} + P_{кр.ТМ}, \quad (3)$$

где $P_{кр.МЭС}$ – номинальная эксплуатационная мощность двигателя, кН;

$P_{кр.п}$, $P_{кр.к}$, $P_{кр.ТМ}$ – сила тяги переднего, заднего мостов трактора и ТМ соответственно, кН.

Аналогично примем, что сила сопротивления качению трактора или МЭС равна сумме сил сопротивления качению мостов трактора или МЭС. Тогда для трактора с ТМ

$$P_{ф.МЭС} = P_{ф.п} + P_{ф.к} + P_{ф.ТМ}, \quad (4)$$

где $P_{ф.МЭС}$ – сила сопротивления качению трактора или МЭС, кН;

$P_{ф.п}$, $P_{ф.к}$, $P_{ф.ТМ}$ – сила сопротивления качению колес переднего, заднего мостов трактора и ТМ соответственно, кН.

Сложив выражения (3) и (4), получим:

$$P_{кр.МЭС} + P_{ф.МЭС} = (P_{кр.п} + P_{ф.п}) + (P_{кр.к} + P_{ф.к}) + (P_{кр.ТМ} + P_{ф.ТМ}). \quad (5)$$

Левая часть уравнения (5) представляет собой часть числителя выражения (1), заключенного в скобку. Так как средняя поступательная скорость всех ведущих мостов одинаковая, то тяговая мощность трактора бу-

дет равна сумме мощностей, реализуемых каждым ведущим мостом МЭС:

$$(P_{кр.МЭС} + P_{ф.МЭС}) v_{тр} = (P_{кр.п} + P_{ф.п}) v_{тр} + (P_{кр.к} + P_{ф.к}) v_{тр} + (P_{кр.ТМ} + P_{ф.ТМ}) v_{тр}. \quad (6)$$

Умножим и поделим каждый член выражения (6) на знаменатель выражения (1) с учетом присущего каждому мосту своего буксования и КПД привода:

$$\begin{aligned} \frac{(P_{кр.МЭС} + P_{ф.МЭС}) v_{тр}}{\eta_{тр.МЭС} (1 - \delta_n)} &= \frac{(P_{кр.п} + P_{ф.п}) v_{тр}}{\eta_{тр1} (1 - \delta_{н.п})} + \\ &+ \frac{(P_{кр.к} + P_{ф.к}) v_{тр}}{\eta_{тр2} (1 - \delta_{н.к})} + \\ &+ \frac{(P_{кр.ТМ} + P_{ф.ТМ}) v_{тр}}{\eta_{тр3} (1 - \delta_{н.ТМ})}. \end{aligned} \quad (7)$$

Запишем, что:

$$\begin{aligned} \frac{(P_{кр.МЭС} + P_{ф.МЭС}) v_{тр}}{\eta_{тр.МЭС} (1 - \delta_n)} &= N_{н.э.МЭС} \\ \frac{(P_{кр.п} + P_{ф.п}) v_{тр.п}}{\eta_{тр1} (1 - \delta_n)} &= N_{н.э.п}; \\ \frac{(P_{кр.к} + P_{ф.к}) v_{тр.к}}{\eta_{тр2} (1 - \delta_n)} &= N_{н.э.к}; \\ \frac{(P_{кр.ТМ} + P_{ф.ТМ}) v_{тр.ТМ}}{\eta_{тр3} (1 - \delta_{ТМ})} &= N_{н.э.ТМ}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $N_{н.э.п}$, $N_{н.э.к}$ и $N_{н.э.ТМ}$ – эффективная мощность двигателя, потребляемая на привод переднего и заднего мостов трактора и на привод активных колес ТМ, кВт;
 $\eta_{тр1}$, $\eta_{тр2}$, $\eta_{тр3}$ – механический КПД ветви трансмиссии от двигателя к переднему, заднему мостам трактора и к ТМ соответственно;

δ_k – допустимое буксование на лущеной стерне зерновых колес заднего моста трактора;

δ_n и $\delta_{ТМ}$ – буксование колес переднего моста и ТМ соответственно с учетом кинематического несоответствия в их приводе.

С учетом (8) выражение (7) можно записать в следующем виде:

$$N_{н.э.МЭС} (1 - \delta_n) = N_{н.э.п} \eta_{тр1} (1 - \delta_{н.п}) + N_{н.э.к} \eta_{тр2} (1 - \delta_{н.к}) + N_{н.э.ТМ} \eta_{тр3} (1 - \delta_{н.ТМ}). \quad (9)$$

Разделив левые и правые части уравнения (9) на $N_{н.э.}$, получим:

$$\eta_{тр.МЭС} (1 - \delta_n) = \eta_{тр1} (1 - \delta_{н.п}) k_{N1M} + \eta_{тр2} (1 - \delta_{н.к}) k_{N2M} + \eta_{тр3} (1 - \delta_{н.ТМ}) k_{N3M}, \quad (10)$$

где $\eta_{МЭС}$ – КПД трансмиссии МЭС;

$\eta_{тр1}$, $\eta_{тр2}$ и $\eta_{тр3}$ – КПД привода переднего, заднего моста трактора и ТМ;

k_{N1M} , k_{N2M} и k_{N3M} – коэффициенты передачи мощно-

сти на привод передних, задних колес трактора (или ЭМ) и колес ТМ в составе МЭС, учитывающие долю мощности, передаваемую через j -й мост для трактора с ТМ:

$$k_{N1M} = \frac{N_{н.э.п}}{N_{н.э.МЭС}}; k_{N2M} = \frac{N_{н.э.к}}{N_{н.э.МЭС}}; k_{N3M} = \frac{N_{н.э.ТМ}}{N_{н.э.МЭС}}.$$

Для расчета коэффициентов передачи мощности используют выражения (8) при обязательном условии:

$$\sum_{j=1}^N k_{Nj} = 1,$$

которое получается из равенства

$$N_{н.э.тр} = \sum_{j=1}^N N_{н.э.р}$$

где $N_{н.э.р}$ – доля эффективной мощности двигателя, передаваемая отдельно на j -й мост.

Тогда для трактора с ТМ:

$$1 = k_{N1M} + k_{N2M} + k_{N3M}.$$

Таким образом, знаменатель выражения (1) следует рассчитывать как произведение механического КПД трансмиссии $\eta_{тр}$ на КПД буксования $(1 - \delta_n)$ с учетом доли мощности, передаваемой через j -й мост:

$$\eta_{тр} (1 - \delta_n) = \sum_{j=1}^N \eta_{трj} k_{Nj} (1 - \delta_{н.ж}). \quad (11)$$

Выражение (1) в общем виде содержит в числителе сумму сил тяги и сил сопротивления качению ведущих мостов, а в знаменателе – сумму механических потерь мощности в трансмиссии и потерь на буксование:

$$N_{н.э.} = \frac{\sum_{j=1}^N (P_{кр.рj} + P_{ф.рj}) v_{тр.рj}}{\sum_{j=1}^N \eta_{трj} k_{Nj} (1 - \delta_{н.ж})}, \quad (12)$$

где k_{Nj} – коэффициент передачи мощности, учитывающий долю мощности, передаваемую через j -й мост;

$\eta_{трj}$ – механический КПД отдельной ветви трансмиссии;

$(1 - \delta_{н.ж})$ – КПД буксования j -го моста.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Разработана методика определения полной мощности двигателя, реализуемой в силу тяги с учетом разного количества ведущих мостов и транспортно-технологического модуля. С ее помощью на примере трактора тягового класса 1,4 рассчитаем мощность двигателя тракторов с балластом и технологическим модулем при переходе от нижнего к верхнему тяговому классу.

Номинальную эксплуатационную мощность двигателя трактора класса 1,4 в разных комплектациях определим согласно (12):

- для трактора нижнего класса 1.4:

$$N_{н.э.тр} = [(14,00 + 4,55) \cdot 2,50] / 0,79 = 58,52 \text{ кВт};$$

Таблица 1

Table 1

Расчет эксплуатационной мощности колесных тракторов в различных комплектациях Calculation of the wheeled tractor operating power in various configurations					
Комплектация Complete set	Номинальное тяговое усилие, кН Rated traction force, kN	Тяговый класс Traction class	Мощность двигателя*, кВт Engine power*, kW	Энергонасыщенность трактора, кВт/кН Tractor energy saturation, kW/kN	
				с балластом или ТМ** with ballast or ТМ**	без балласта и ТМ** without ballast or ТМ**
на базе трактора класса 1,4 / based on a class 1.4 tractor					
без балласта without ballast	14	1,4	58,52/60,18	–	1,64
с балластом with ballast	20	2	83,91/85,97	1,64	2,28
	30	3	125,86/128,96	1,64	3,52
с ТМ with ТМ	20	2	83,55/87,09	1,67	2,29
	30	3	125,64/134,31	1,68	3,52
на базе трактора класса 2 / based on a class 2 tractor					
без балласта without ballast	20	2	83,60/85,97	–	1,64
с балластом with ballast	30	3	125,86/128,96	1,64	2,47
с ТМ with ТМ	30	3	125,37/131,07	1,67	2,46
на базе трактора класса 3 / based on a class 3 tractor					
без балласта without ballast	30	3	125,98/129,31	–	1,65
с балластом with ballast	40	4	162,59/164,75	1,64	2,19
	50	5	203,24/205,94	1,59	2,66
с ТМ with ТМ	40	4	163,54/168,76	1,68	2,19
	50	5	205,63/215,56	1,65	2,69
на базе трактора класса 4 / based on a class 4 tractor					
без балласта without ballast	40	4	162,57/164,75	–	1,59
с балластом with ballast	50	5	203,24/205,94	1,59	1,99
	60	6	243,89/256,09	1,59	2,39
с ТМ with ТМ	50	5	204,02/209,60	1,63	2,00
	60	6	246,12/256,09	1,64	2,41
*В числителе расчет проведен по предлагаемой методике, в знаменателе – по традиционной; **ТМ – технологический модуль *In the numerator, the calculation was carried out according to the proposed method, in the denominator – according to the traditional method; **ТМ – technological module					

- для трактора верхнего класса на базе трактора класса 1.4 с балластом:

$$N_{н.э.тр.б} = [(20,00 + 6,63) \cdot 2,50] / 0,79 = 83,91 \text{ кВт};$$

- для трактора верхнего класса на базе трактора класса 1.4 с ТМ:

$$N_{н.э.МЭС} = [(20,00 + 5,83) \cdot 2,50] / 0,77 = 83,55 \text{ кВт}.$$

Таким образом, в случае применения трактора Беларус 82.1 с ТМ необходимо провести комплекс мер по увеличению мощности двигателя трактора минимум на 25 кВт для перевода его с ТМ в тяговый класс 2.

Номинальную эксплуатационную мощность двигателя трактора класса 1.4 в разных комплектациях определим согласно традиционной методике расчета (1), но с учетом доли мощности двигателя, реализуемой через отдельные мосты, так как иначе КПД трансмиссии невозможно определить:

- для трактора нижнего класса 1,4:

$$N_{н.э.тр} = [(14,00 + 4,64) \cdot 2,50] / 0,90 \cdot (1 - 0,14) = 60,18 \text{ кВт};$$

- для трактора верхнего класса на базе трактора класса 1.4 с балластом:

Таблица 2

Table 2

СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ И ЗАЯВЛЕННОЙ ЗАВОДОМ-ИЗГОТОВИТЕЛЕМ* МОЩНОСТИ ТРАКТОРА (В СКОБКАХ ДАННЫЕ ИЗ ЛИТЕРАТУРЫ), кВт
THE COMPARISON OF THE CALCULATED AND DECLARED BY THE MANUFACTURER * TRACTOR POWER
(IN BRACKETS, THERE ARE DATA FROM THE LITERATURE), kW

Показатели Indicators	Тяговый класс Traction class			
	1.4	2.0	3.0	5.0
Тракторы / Tractors: расчетное значение / calculated value заявленное значение / declared value:				
MT3-82.1	58,52 58,84 (0,54)	83,60 —	125,98 —	203,21 —
MT3-1221	—	95,6 (14,35)	—	—
T-150K	—	—	121,36 (–3,67)	—
K-744	—	—	—	220,65 (8,58)
Трактор с ТМ* / Tractors with ТМ: расчетное значение / calculated value заявленное значение / declared value0	— —	— —	123,06 117,6 (4,64)	205,63 162,0 (26,93)
*В скобках указано отклонение, %; **ТМ – технологический модуль *In brackets, deviation is indicated, %; **ТМ – technological module				

$$N_{н.з.тр.б} = [(20,00 + 6,65) \cdot 2,50] / 0,90 \cdot (1 - 0,14) = 85,97 \text{ кВт};$$

- для трактора верхнего класса на базе трактора класса 1.4 с ТМ:

$$N_{н.з.МЭС} = [(20,00 + 5,83) \cdot 2,50] / 0,86 \cdot (1 - 0,14) = 83,55 \text{ кВт}.$$

Результаты расчетов мощности двигателя колесных тракторов в различных комплектациях приведены в таблице 1.

При всех комплектациях имеется превышение мощности при расчете по традиционной методике на 1,31-6,23% (табл. 1).

Отклонение рассчитанной по предлагаемой методике мощности трактора от данных, приведенных заводом-изготовителем, находится в пределах 0,54-8,58% (табл. 2). Отклонение наблюдается как в сторону превышения мощности, так и в сторону ее недостаточности. Это можно объяснить особенностью подбора тракторным заводом конкретной модели двигателя. Исключение составляет трактор MT3-1221, который обычно рассматривают вне тяговой концепции.

Расхождение расчетной мощности тракторов и данных, приведенных в литературе [16-20], составляет от 4,64 и 26,93%. МЭС, сформированное на базе трактора Т-150К тягового класса 3.0, имело мощность, не достаточную для тягового класса 5.0. Кроме того, оно развивало меньшую скорость в сравнении с трактором К-701 класса 5.0 [18].

Выводы. Для достижения предельной по сцеплению силы тяги на крюке при переходе в следующий более высокий класс тяги необходимо, чтобы трактор, к которому подсоединяется технологический модуль, обладал энергонасыщенностью 2,0-2,41 кВт/кН, что соответствует тракторам тягово-энергетической концепции, у которых мощность двигателя не может быть реализована через тягу. При этом энергонасыщенность трактора с технологическим модулем будет равна 1,59-1,65 кВт/кН, аналогично трактору тяговой концепции, и позволяет реализовать заложенную мощность двигателя через тягу.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Годжаев З.А., Бейлис В.М., Шевцов В.Г., Лавров А.В. Нормативы и прогнозирование потребности сельскохозяйственного производства в технике // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2020. Т. 67. N4(41). С. 151-158.
- Sidorov V.N., Voinash S.A., Ivanov A.A., Petrov S.A. Modular-Technological Scheme for Tractors of Traction Classes 1.4. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 666. 042048.
- Кузьков Г.М. Энергонасыщенность и классификация тракторов // *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2009. N5. С. 11-14.
- Кузьков Г.М. Развитие технической концепции трактора // *Тракторы и сельхозмашины*. 2019. N1. С. 27-35.
- Кузьков Г.М. Потенциальная производительность трактора // *Тракторы и сельхозмашины*. 2017. N5. С. 48-52.
- Шутенко В.В., Перевозчикова Н.В., Хорт Д.О. Сравнение эффективности использования балластных грузов и транспортно-технологических модулей для повышения тягово-сцепных свойств трактора // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2019. N3(32). С. 162-168.
- Кузьков Г.М., Грибов И.В., Перевозчикова Н.В. Балластирование сельскохозяйственных тракторов // *Тракторы и сельхозмашины*. 2017. N9. С. 52-60.
- Лавров А.В., Сидоров М.В., Воронин В.А. Технологический модуль для крестьянских фермерских хозяйств // *Сельский механизатор*. 2021. N3. С. 5-7.
- Сидоров М.В., Лавров А.В., Воронин В.А. Модульно-технологическая схема для тракторов тягового класса 1,4 // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2019. N4(37). С. 57-62.

10. Лавров А.В., Шевцов В.Г., Зубина В.А., Русанов А.В. Обоснование требований на мобильное энергетическое средство класса 0,6-0,9 // *Технический сервис машин*. 2020. N3(140). С. 57-66.

11. Lavrov A., Smirnov I., Litvinov M. Justification of the construction of a self-propelled selection seeder with an intelligent seeding system. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 224. 05011.

12. Lavrov A., Shevtsov V., Sidorov M. Algorithm of adaptation results tractors tractive tests based on systems OECD and ISO. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 126. 00035.

13. Сидоров В.Н., Локтик О.В., Сидоров М.В. Повышение производительности машинно-тракторного агрегата применением промежуточного энергетического модуля // *Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения*. 2002. N1(1). С. 112-115.

14. Сидоров В.Н., Сидоров М.В., Кутков Г.М. Расчет мощности двигателя и веса трактора тягово-энергетической концепции // *Электронный журнал: Наука, техника и образование*. 2016. N2(6). С. 37-46.

15. Грибов И.В., Перевозчикова Н.В. Мощность – основ-

ной показатель для трактора тягово-энергетической концепции // *Техника и технологии АПК*. 2017. N5. С. 18-21.

16. Кутков Г.М. Исследования модульного энерготехнологического средства // *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 1989. N12. С. 3-9.

17. Соловьев Р.Ю., Черанев С.В., Карякин С.Б., Коломейченко А.В., Грибов И.В. Актуальность разработки высоко-технологичных тракторов тяговых классов 0,6-2 // *Техника и оборудование для села*. 2019. N11(269). С. 14-17.

18. Кутков Г.М. Тракторы и автомобили. Теория и технологические свойства. М.: КолосС. 2004. 505 с.

19. Бережнов Н.Н., Аверичев Л.В. Обоснование энергонасыщенности колесного трактора по данным контрольного динамометрирования агрегата // *Достижения науки и техники АПК*. 2018. Т. 32. N12. С. 76-81.

20. Berezhnov N. Traction-speed properties of wheeled mobile power equipment for agricultural purposes. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. *12th International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry, INTERAGROMASH*. 2019. 012038.

REFERENCES

1. Godzhaev Z.A., Beylis V.M., Shevtsov V.G., Lavrov A.V. Normativy i prognozirovaniye potrebnosti sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva v tekhnike [Norms and forecast of the agricultural production need for machinery]. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2020. Vol. 67. N4 (41). 151-158 (In Russian).

2. Sidorov V.N., Voinash S.A., Ivanov A.A., Petrov S.A. Modular-Technological Scheme for Tractors of Traction Classes 1.4. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 666. 042048 (In English).

3. Kut'kov G.M. Energonasyshchennost' i klassifikatsiya traktorov [Energy saturation and classification of tractors]. *Traktory i sel'skokhozyaystvennyye mashiny*. 2009. N5. 11-14 (In Russian).

4. Kut'kov G.M. Razvitie tekhnicheskoy kontseptsii traktora [The development of the technical concept of the tractor]. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2019. N1. 27-35 (In Russian).

5. Kut'kov G.M. Potentsial'naya proizvoditel'nost' traktora [Potential productivity of the tractor]. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2017. N5. 48-52 (In Russian).

6. Shutenko V.V., Perevozchikova N.V., Khort D.O. Sravnenie effektivnosti ispol'zovaniya ballastnykh gruzov i transportno-tekhnologicheskikh moduley dlya povysheniya tyagovostsepykh svoystv traktora [Comparison of the efficiency when using ballast weights and transport and technological modules to improve the traction and coupling properties of the tractor]. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*. 2019. N3(32). 162-168 (In Russian).

7. Kut'kov G.M., Gribov I.V., Perevozchikova N.V. Ballastirovanie sel'skokhozyaystvennykh traktorov [Agricultural tractor ballasting]. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2017. N9. 52-60 (In Russian).

8. Lavrov A.V., Sidorov M.V., Voronin V.A. Tekhnologicheskii modul' dlya krest'yanskikh fermerskikh hozyaystv [Technology module for peasant farms]. *Sel'skiy mekhanizator*. 2021. N3. 5-7 (In Russian).

9. Sidorov M.V., Lavrov A.V., Voronin V.A. Modul'no-tekhnologicheskaya skhema dlya traktorov tyagovogo klassa 1,4 [Modular technological scheme for tractors of traction classes 1.4]. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2019. N4(37). 57-62 (In Russian).

10. Lavrov A.V., Shevtsov V.G., Zubina V.A., Rusanov A.V. Obosnovaniye trebovaniy na mobil'noye energeticheskoye sredstvo klassa 0,6-0,9 [Substantiation of the requirements for a mobile energy device of class 0.6-0.9]. *Tekhnicheskii servis mashin*. 2020. N3(140). 57-66 (In Russian).

11. Lavrov A., Smirnov I., Litvinov M. Justification of the construction of a self-propelled selection seeder with an intelligent seeding system. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 224. 05011 (In English).

12. Lavrov A., Shevtsov V., Sidorov M. Algorithm of adaptation results tractors tractive tests based on systems OECD and ISO. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 126. 00035 (In English).

13. Sidorov V.N., Loktik O.V., Sidorov M.V. Povysheniye proizvoditel'nosti mashinno-traktornogo agregata primeneniem promezhutochnogo energeticheskogo modulya [Increasing the productivity of the machine-tractor unit by using an intermediate energy module]. *Konstruirovaniye, ispol'zovaniye i nadezhnost' mashin sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya*. 2002. N1(1). 112-115 (In Russian).

14. Sidorov V.N., Sidorov M.V., Kut'kov G.M. Raschet moshchnosti dvigatelya i vesa traktora tyagovo-energeticheskoy kontseptsii [Calculation of engine power and weight of a towing pow-

er concept tractor]. *Elektronnyy zhurnal: Nauka, tekhnika i obrazovanie*. 2016. N2(6). 37-46 (In Russian).

15. Gribov I.V., Perevozchikova N.V. Moshchnost' – osnovnoy pokazatel' dlya traktora tyagovo-energeticheskoy kontseptsii [Power as the main indicator for a tractor of tractive force-and-output concept]. *Tekhnika i tekhnologii APK*. 2017. N5. 18-21 (In Russian).

16. Kut'kov G.M. Issledovaniya modul'nogo energotekhnologicheskogo sredstva [Research into modular power-processing means]. *Traktory i sel'skhozaystvennye mashiny*. 1989. N12. 3-9. (In Russian)

17. Solov'ev R.Yu., Cheranov S.V., Karyakin S.B., Kolomeychenko A.V., Gribov I.V. Aktual'nost' razrabotki vysokotekhnologichnykh traktorov tyagovykh klassov 0,6-2 [The relevance of developing of high-tech tractors of traction classes 0.6-2]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2019. N11(269). 14-17 (In Russian).

18. Kut'kov G.M. Traktory i avtomobili. Teoriya i tekhnologicheskie svoystva [Tractors and cars. Theory and technological properties]. Moscow: KolosS. 2004. 505 (In Russian).

19. Berezhnov N.N., Averichev L.V. Obosnovanie energonasyshchennosti kolesnogo traktora po dannym kontrol'nogo dinamometrirovaniya agregata [Justification of power/ weight ratio of a wheel tractor on the basis of data of control dynamometer test of the aggregate]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2018. Vol. 32. N12. 76-81 (In Russian).

20. Berezhnov N. Traction-speed properties of wheeled mobile power equipment for agricultural purposes. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. *12th International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry, INTERAGROMASH*. 2019. 012038 (In English).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 20.04.2021
The paper was submitted
to the Editorial Office on 20.04.2021

Статья принята к публикации 25.05.2021
The paper was accepted
for publication on 25.05.2021